ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر نوع سطح تماس بر مقاومت اصطکاکی اتصالات پیچی*

موسی محمودی صاحبی[۱] میلاد کوثری[۲] مهران لرستانی[۳]

چکیده *نوع سطح تماس صفحات اتصال، تأثیر به‌سزایی بر مقاومت اصطکاکی اتصالات پیچی دارد. هدف این تحقیق ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر نوع سطح تماس ورق‌ها بر مقاومت اصطکاکی اتصالات پیچی و هم‌چنین پیشنهاد سطوح تماس جدید به‌منظور افزایش ظرفیت باربری اصطکاکی است. برای این منظور ۱۴ نمونه از اتصالات پیچی اصطکاکی با سطوح تماس مختلف انتخاب گردید. سطوح تماسی بررسی‌شده در این تحقیق ، عبارتند از: ماسه‌پاشی شده، ماسه‌پاشی نشده، رنگ با ضخامت ۲۰ میکرون، رنگ با ضخامت ۴۰ میکرون، آج‌دار مثلثی و آجدار مربعی. نتایج آزمایش نشان داد که نمونه‌های آج‌دار مربعی و مثلثی، بیشترین مقاومت اصطکاکی را دارند و نمونه‌ی با سطح رنگ شده‌ی ۴۰ میکرون، دارای کمترین مقاومت است.*

واژه‌های کلیدی مقاومت اصطکاکی، اتصال پیچی اصطکاکی، سطوح تماس اتصال، ضریب اصطکاک، سطوح آج‌دار.

Experimental Evaluation of the Effect of Contact Surfaces on Friction Resistance of Bolt Connections

M. Mahmoudi M. Kosari M. Lorestani

Abstract *The type of contact surface has a significant impact on the frictional resistance. Experimental evaluation of the effect of contact surfaces on bolt connections has been conducted in current research. The purpose of this study is to study the effect of different levels of contact surface on the frictional resistance and propose a new method for increasing frictional resistance. Contact surfaces used in this research are as follow: non sand-blasted, sand-blasted, coating with 20 µ thickness, coating with 40 µ thickness, triangular corrugated surface and squared corrugated surface. The results indicate that, the highest and the lowest bearing capacity were captured according to corrugated surface and 40 µ coated surface, respectively.*

Key Word Friction Resistance, Bolt friction connection, Connection surfaces, Friction coefficient, Corrugated surface.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۸/۷/۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۸/۳ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

Email: m.mahmoudi@sru.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۳) کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

اتصالات در همه‌ی سازه‌ها ازجمله سازه‌های فولادی یکی از اجزای مهم سازه به شمار می‌آیند و عامل اصلی یکپارچگی عملکرد سیستم سازه‌ای هستند. به‌طور کلی نوع و رفتار اتال مشخص‌کننده‌ی عملکرد قاب خواهد بود. یک اتصال ضعیف و نامناسب می‌تواند منجر به ضعف اساسی در سازه‌های فولادی گردد. اتصالات پیچی به‌دلیل سرعت بسیار بالا در اجرا و اطمینان از رفتار آنها، از بهترین انواع اتصال در سازه‌های فولادی هستند که در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند. این اتصالات یکی از انواع اتصالات جداشدنی است که در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرگاه اتصالی مورد نیاز باشد که بتوان بدون شکست قطعات، آنها را از هم جدا نمود و درعین‌حال دربرابر بارهای کششی، برشی و گشتاورهای وارده یا ترکیبی از آنها و هم‌چنین بارهای متناوب به‌اندازه‌ی کافی مقاوم باشد، به کارگیری اتصالات پیچی از فولاد های پرمقاومت، گزینه‌ی مناسبی است. اتصالات پیچی به دو گروه اتصالات اصطکاکی و اتکایی تقسیم می‌شوند. مطابق مبحث دهم مقررات ملی [1] استفاده از اتصالات اصطکاکی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها اجباری است. بنابراین در اکثر سازه‌ها از این اتصالات اصطکاکی استفاده می‌شود. در این اتصالات با اعمال گشتاور پیچشی جهت بستن پیچ‌ها، نیروی کششی درراستای محور پیچ به‌وجود می‌آید که به نیروی پیش‌تنیدگی معروف است. از آن جایی که ساخت قطعات ساختمان‌های با اتصالات پیچی در کارخانه و نصب آنها در محل پروژه، صورت می‌پذیرد، لذا خطاهایی مانند تغییر اندازه‌ی سوراخ پیچ‌ها، عدم رعایت فاصله‌ی مناسب پیچ‌ها و سوراخ‌ها از لبه‌ی ورق اتصال، وجود خرابی و آلودگی در محل سطح اتصال و عدم تأمین نیروی پیش‌تنیدگی پیچ ها به‌وجود می‌آید که می‌تواند نتایج طراحی را دستخوش تغییرات زیادی کند.

در اتصالات پیچی اصطکاکی، دو عامل در مقدار مقاومت اتصال، تأثیرگذار است که عبارتند از: مقدار پیش‌تنیدگی در پیچ‌ها و مقدار ضریب اصطکاک سطوح در تماس با یکدیگر. در همین راستا به‌منظور طراحی بهینه‌ی اتصالات پیچی اصطکاکی باید تأثیر این عوامل را برروی میزان مقاومت اتصال به‌درستی لحاظ کرد و باید بررسی شود که میزان تأثیر ضخامت رنگ برروی اتصالات پیچی اصطکاکی چگونه و به چه اندازه است؟ در صورت ماسه‌پاشی کردن نمونه‌ها، به چه میزان ظرفیت اتصالات اصطکاکی افزایش یا کاهش می‌یابد؟ با چه روشی می‌توان مقدار مقاومت اصطکاکی نمونه‌ها را افزایش داد؟

در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، به‌دلیل این‌که انتظار می‌رود ساختمان‌هایی بااهمیت متوسط مثل ساختمان‌های مسکونی دربرابر زلزله‌ی سطح ضعیف یا بهره‌برداری دارای عملکرد قابلیت بهره‌برداری باشند و اتصالات آنها دربرابر این زلزله‌ها بدون لغزش باقی بمانند، لذا اتصالات پیچی آنها به‌صورت اصطکاکی طراحی می‌شوند. درصورتی‌که این هدف برای ساختمان‌هایی با اهمیت خیلی زیاد مثل بیمارستان‌ها متفاوت است. بیمارستان‌ها باید دربرابر زلزله‌ی شدید یا طرح قابل بهره‌برداری باقی بمانند، لذا نیاز به مقاومت اصطکاکی بیشتری دارند. بنابراین دانستن این موضوع بسیار مهم است که آیا می‌شود با استفاده از سطوح تماس جدید مقاومت اتصالات پیچی اصطکاکی را افزایش داد؟

زینالی و همکاران [2] مطالعاتی برروی پدیده‌ی برش قالبی در اتصالات اصطکاکی انجام دادند. برش قالبی یکی از مدهای خرابی اتصالات پیچی است که قبل از رسیدن نمونه به استحکام نهایی اتفاق می‌افتد. در این مقاله اثر اصطکاک در اتصالات پیچی بر مقاومت و مد شکست برش قالبی به‌روش آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله ویژگی های مصالح، تعداد پیچ‌ها، مقدار ضریب اصطکاک و نوع عملکرد اتصال به‌عنوان متغییر های مؤثر در رفتار

اتصالات پیچی پرمقاومت مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج مطابقت خوبی با نتایج آزمایش‌های انجام‌شــده در این زمینه داشــته‌اســت. آنها نتیجه گرفتند با افزایش ضـریب اصـطکاک سـطوح، کاهش ضـخامت ورق‌ها و کاهش مقاومت مصـــالح نمونه‌ها، مقاومت اصـــطکاکی اتصالات افزایش می‌یابد. در انتها به بررسی و مقایسه‌ی روابط پیش‌بینی گســیختگی برش قالبی پرداختند و یک فرمول برای پیش‌بینی مد شکست قالبی ارائه دادند.

کوچاکس و همکاران [3] به‌منظور بررســی اثر تماس برروی اتصـالات پیچی مطالعات آزمایشـگاهی و تحلیلی انجام دادند. مطالعه‌ی آنها برروی اتصالات پیچی بـدون اعمـال نیرو برروی پیچ‌هـا متمرکز بود. نتـایج آزمایشگاهی و تحلیلی نشان داد که نیروی تماسی بین اجزای به‌هم متصل‌شده تأثیر به‌سزایی در رفتار اتصالات فلنجی و L شکل تحت تأثیر نیروی کششی دارد. نتایج تأیید می‌کند که در صورت افزایش مقدار نسبی سختی فلنج، ســختی پیچ‌ها کاهش پیدا می‌کند و پدیده‌ی اهرمی‌شدن، افزایش می‌یابد.

رودگرز و همکـاران [4] در یـک تحقیق آزمایشــگاهی و تحلیلی، تأثیر مصــالحی به نام شــیم بر نیروی لغزش اتصالات اصطکاکی را بررسی کردند. در این پژوهش اتصــالات اصــطکاکی نامتقارن به‌طور کامل به صورت غیرخطی مدل سازی شدند. هم‌چنین در این مطالعه تأثیر رنگ نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشــان داد که افزایش دامنه‌ی اصــطکاک تغییرات خوبی را در منحنی هیسترزیس ایجاد می‌کند و باعث تأخیر در زوال منحنی می‌شود.

در سال ۲۰۱٦ شانون و همکاران [5] درزمینه‌ی اتصالات اصطکاکی بااستفاده از آج‌زدن ورق‌ها به‌منظور افزایش ظرفیت اتصال کار کردند. در این تحقیق ۱۸ نمونه شامل ٤ نمونه اتصال پیچی پر مقاومت و ١٤ نمونه اتصال پیچی آج‌دار مورد آزمایش قرار گرفت. مد اصلی خرابی این اتصالات، خرابی برشی پیچ‌ها، جابه‌جایی ورق‌ها و هرز شدن پیچ‌ها بوده‌است.

یینگ هو و همکاران [6] رفتار اتصــالات پیچی پر مقاومت اصــطکاکی را بااســتفاده از روش عددی و آزمایشگاهی، بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند، صاف شدن رزوه‌ها و باریک شدن ساق رزوه شده‌ی پیچ‌ها، تحت تأثیر زاویه‌ی بین رزوه‌های داخلی و خارجی تنه‌ی پیچ‌ها است.

شـهانی [7] برروی اثر پیش بارگذاری برروی عمر خســتگی پیچ‌ها کار کرد. در این مطالعه اثر مقدار پیش‌تنیدگی مورد نقد و بررسی قرار گرفت و یک سری نمودار نیرو-تکرار برای بررسی این موضوع با سطوح مختلف پیش‌تنیدگی ترســیم شــد. به‌همین‌منظور یک دستگاه آزمایش ساخته شد تا به‌کمک آن بتوان نتایج را مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نیروی پیش‌تنیدگی با افزایش سهم تنش‌های تولید شده در پیچ باعث کاهش محدوده‌ی استقامتی پیچ‌ها می‌شود. با این حال خارج از مقدار میانگین تنش‌ها، مقدار مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

تیم و همکاران [8] خصوصیات کششی اتصالات اصطکاکی با پیچ‌های پر مقاومت را براساس زوال نیروی پیش‌تنیدگی در اثر آسیب‌دیدگی سر پیچ‌ها بررسی کردند. آنها ۱۸ نمونه اتصال پیچی تست نمودند تا مقاومت کششی آنها را بررسی کنند. در این نمونه‌ها آسیب مصنوعی برروی کلگی پیچ ایجاد شد که باعث از دست رفتن نیروی پیش‌تنیدگی شد. در این نمونه‌ها، مقاومت اصطکاکی نمونه‌ها متأثر از نیروی پیش‌تنیدگی بود و ازاین‌رو بار اصطکاکی آنها به‌مقدار کمی کاهش یافت که این مقدار بستگی به مقدار آسیب کلگی پیچ داشت. برای پیش‌بینی مقاومت اصطاکی اتصالات اصطکاکی پیچی از رابطه‌ی اصطکاک بار- نیروی پیش‌تنیدگی، معادله‌ی مقاومت اصطکاکی مورد استفاده قرار گرفت.

فنـگ وی و همکـاران [9] یـک مطـالعـه‌ی آزمایشگاهی و عددی برروی رفتار شکست اتصالات پیچی فولادی با آرایش‌های هندسی مختلف انجام دادند. آنها ۳٦ نمونه را با مقیاس واقعی تحت آزمایش کشــش قرار دادند. پارامتر اصلی آزمایش شامل الگوی هندسی اتصال، جزئیات اتصال از قبیل فاصله‌ی طولی و عرضی بین پیچ‌ها، فاصله‌ی لبه و مصالح بود. نتایج نشان داد که

پیش‌بینی ظرفیت نهایی از قاعده‌ی g٤/٢S پیروی می‌کند.

یان بو وانگ و همکاران [10] ٢٤ اتصال پیچی ساخته شده از ٣ نوع فولاد پرمقاومت با مقاومت تسلیم اسمی ٥٥٠، ٦٩٠ و ٨٩٠ مگاپاسکال برای بررسی رفتار اتصالات فولادی پرمقاومت استفاده نمودند. آنها در این پژوهش اثرات فاصله‌ی انتهایی سوراخ از لبه و فاصله‌ی سوراخ‌ها از هم و نوع فولاد برروی رفتار باربری پیچ را مورد بررسی قرار دادند. میزان کشیدگی سوراخ پیچ به‌دلیل باربری پیچ روی ورق فولاد اندازه‌گیری شد و مقاومت باربری ورق مورد بحث قرار گرفت.

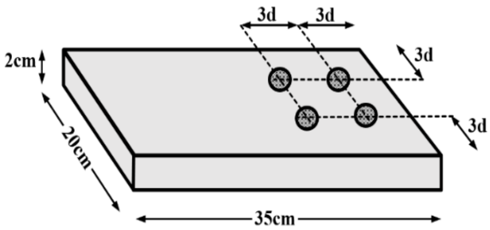
هدف این تحقیق ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر نوع سطح تماس ورق‌ها بر مقاومت اصطکاکی اتصالات پیچی و هم‌چنین پیشنهاد سطوح تماس جدید به‌منظور افزایش ظرفیت باربری اصطکاکی است. سطوح تماسی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: سطح تماس ماسه‌پاشی شده، ماسه‌پاشی‌نشده، رنگ با ضخامت ٢٠ میکرون، رنگ با ضخامت ٤٠ میکرون، سطح آج‌دار مثلثی و سطح آج‌دار مربعی.

روش تحقیق

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی تأثیر نوع سطح تماس بر مقاومت اتصالات پیچی اصطکاکی از مطالعات آزمایشگاهی استفاده شد. با اندازه‌گیری نیروی اعمالی به اتصال و تغییر شکل ایجاد شده، منحنی بار-تغییر شکل برای اتصالات ترسیم گردید و به‌کمک آنها مقاومت اتصالات پیچی تعیین شد.

نمونه‌های مورد استفاده

در این تحقیق ١٤ اتصال با شرایط مختلف آزمایشگاهی آماده‌سازی شد. در تمامی حالت‌ها از ٤ پیچ استفاده شد. در تمامی‌نمونه‌های آزمایشگاهی ضخامت صفحات اتصال برابر ٢٠ میلی‌متر، عرض صفحات برابر ٢٠٠ میلی‌متر و طول صفحات برابر ٣٥٠ میلی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل (١) نشان داده شده‌است، فاصله‌ی پیچ‌ها از لبه برابر ٦٠ میلی‌متر و فاصله‌ی محور تا محور پیچ‌ها درراستای موازی با بارگذاری و عمود بر بارگذاری برابر ٨٠ میلی‌متر لحاظ شده‌است.



شکل ١ جزئیات هندسی نمونه‌های آزمایش

پیچ‌های مورد استفاده از نوع پرمقاومت A490 با قطرهای ١٦، ٢٠، ٢٢ و ٢٤ با طول ٧ سانتی‌متر انتخاب شد. برای اینکه ناحیه‌ی رزوه‌شده در محل اتصال دو ورق قرار نگیرد از پیچ‌هایی با طول ناحیه‌ی رزوه‌نشده برابر٦٠٪ طول کل پیچ استفاده شد. برای بررسی تأثیر نوع سطح تماس در میزان مقاومت، سطوح تماس تمیز شده با ماسه‌پاشی، بدون ماسه‌پاشی، رنگ شده با ضخامت‌های ٢٠ و ٤٠ میکرون و سطوح تماس آج‌دارشده با شیارهای مثلثی و مربعی انتخاب گردید. برای آج‌دار کردن سطوح تماس از دستگاه فرز میزی استفاده شد (شکل ٢). برای پیش‌تنیده کردن پیچ‌های پرمقاومت از آچار ترک‌متر براساس ضوابط پیشنهادی در مبحث دهم استفاده شد. بر اساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی، برای ایجاد نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌های با قطر ١٦ میلی‌متر، لنگر پیچشی ٣٥٠ نیوتن متر باید اعمال شود. در تمامی‌آزمایش‌ها در قسمت زیر کلگی پیچ و زیر مهره از واشر استفاده شد.

برای نمونه‌های با قطر ١٦ میلی‌متر، سطوح سندبلاست‌نشده، سندبلاست‌شده، رنگ‌شده با ضخامت مختلف و آج‌دار به شکل‌های مربعی و مثلثی در نظر گرفته شد. برای نمونه‌های با قطر ٢٠، ٢٢ و ٢٤ میلی‌متر فقط سطوح سندبلاست‌نشده و سندبلاست‌شده مد نظر قرار گرفت. در تمامی اتصالات، نوع سوراخ از نوع

استاندارد بود که با استفاده از روش متهی دوار و ۲ میلی‌متر بزرگ‌تر از قطر پیچ ایجاد گردید.

نمونه‌های مورد آزمایش براساس قطر پیچ و نوع حالت سطح اتصال دسته‌بندی و نام‌گذاری شدند (جدول ۱). در نام‌گذاری S به‌معنی ماسه‌پاشی شده، NS به‌معنی ماسه‌پاشی‌نشده، C20 به‌معنی ۲۰ میکرون رنگ، C40 به‌معنی ۴۰ میکرون رنگ، Tr به‌معنی آج مثلثی و Sq به‌معنی آج مربعی است. قطر پیچ بعد از حرف F و ضخامت آج بعد از علامت اختصاری مربوط نوشته می شود؛ به‌عنوان مثال نمونه‌ی F16C40 یعنی اتصال با پیچ‌هایی به قطر ۱۶ میلی‌متر و ۴۰ میکرون رنگ.



شکل ۲ آج زدن صفحات اتصال

جدول ۱ جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

نام نمونه	نوع سطح تماس	قطر پیچ	نیروی پیش‌تنیدگی (تن)
F16S	سندبلاست‌شده	M16	۱۱/٤
F16NS	سندبلاست‌نشده	M16	۱۱/٤
F16C40	رنگ‌شده با ضخامت ٤۰ میکرون	M16	۱۱/٤
F16C20	رنگ‌شده با ضخامت ۲۰ مکرون	M16	۱۱/٤
F16Tr1	آج‌دار با ارتفاع ۱ میلی‌متر	M16	۱۱/٤
F16Tr1.5	آج‌دار با ارتفاع ۱,۵ میلی‌متر	M16	۱۱/٤
F16Sq1	آج‌دار با ارتفاع ۱ میلی‌متر	M16	۱۱/٤
F16Sq1.5	آج‌دار با ارتفاع ۱,۵میلی‌متر	M16	۱۱/٤
F20S	سندبلاست‌شده	M20	۱۷/٤
F20NS	سدبلاست نشده	M20	۱۷/٤
F22S	سندبلاست شده	M22	۲۲/۱
F22NS	سندبلاست نشده	M22	۲۲/۱
F24S	سندبلاست شده	M24	۲۵/۷
F24NS	سندبلاست نشده	M24	۲۵/۷

نحوه‌ی انجام آزمایش

در انجام آزمایش ها، نمو نه ها میان دو فک دســـتگاه یونیور سال قرار گرفتند و به آنها نیروی ک ش شی اعمال شـــد. برای ثبت نتایج به‌دســـت‌آمده از آزمایش‌ها، از دســـتگاه LVDT و دیتالاگر اســـتفاده شـــد تا میزان جابه‌جایی ناحیه‌ی اتصـــال با دقت بالایی ثبت گردد. شکل (۳) د ستگاه ک شش موردا ستفاده در تحقیق را از مدل WEW– 1000B با ظرفیت ۱۰۰ تن نشان می‌دهد.

د ستگاه یونیور سال، با دو فک کتابی شکل، نمونه‌ها را تحت نیروی کششی قرار می‌دهد، به این صورت که فک پایین ثابت و فک بالا حرکت می‌کند. فک های د ستگاه کشش این قابلیت را دارند که نمونه‌های اتصال را درراســـتای مســـتقیم قرار دهند تا نمونه تحت نیروی همراه با خروج از محوریت قرار نگیرد. میزان ســـرعت بارگذاری به‌صورت دستی قابل تنظیم است که براساس ASTM میزان ســـرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شـــد. دســـتگاه کشـــش یونیورســـال نمودارهایی به صورت نیرو-جابه‌جایی، تنش-کرنش و نیرو-زمان را ا ندازه‌گیری می ن‌ما ید. منحنی نیرو- جا به جایی میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده‌ی واقع در دو سر فک است که این جابه‌جایی شامل جابه‌جایی ناحیه‌ی اتصال، کش آمدن ورق فولادی و سر خوردن فک‌ها اســت. بنابراین برای برر سی جابه‌جایی محل اتصال در اتصالات پیچی اصطکاکی نیاز به درنظر گرفتن میزان جابه‌جایی در محل اتصـــال اســـت لذا برای مشـــخص کردن مقدار دقیق جابه‌جایی در محل اتصـال از دسـتگاه LVDT اسـتفاده شد. به این صورت که با قرار دادن LVDT روی پایه‌ی ساعتی و قرار دادن پایه‌ی ساعتی در انتهای محل اتصال و با جوش دادن ورقی عمود بر ورق اتصـــال دیگر به‌عنوان مبنا در ابتدای اتصـــال میزان جابه‌جایی در این ناحیه مشـــخص شـــد، اما از آنجایی‌که خروجی های د ستگاه یونیور سال و د ستگاه LVDT به صورت فایل جداگانه ذخیره می‌شـــوند بنابراین باید خروجی های دســـتگاه یونیورســـال WEW-B1000 با خروجی‌های LVDT از لحاظ رکوردگیری قابلیت تطابق داشته باشند. خروجی های نیروی رکوردشـــده توســـط دســـتگاه یونیورســـال WEW-B1000 هر یک‌دهم ثانیه ذخیره می‌شـــدند و دســـتگاه LVDT توانایی رکورد از ۲۰ میلی ثانیه تا چند ثانیه را داشـــت که در این حالت جابه‌جایی‌های به‌د ست‌آمده از LVDT برا ساس د ستگاه یونیورســـال یعنی هر یک‌دهم ثانیه تنظیم شـــد تا نیروی به‌دست‌آمده از خروجی دستگاه یونیورسال و جابه‌جایی به‌دســـت‌آمده از خروجی LVDT با هم مطابقت داشـــته باشند.



شکل ۳ تست کشش

به‌دلیل حفاظت از دستگاه آزمایش و جلوگیری از آسیب به آن در اثر خرابی ناگهانی نمونه‌ها، بارگذاری نمونه‌های اتصال با سطوح تماس بدون آج، تا زمانی ادامه می‌یابد که اتصال از ناحیه‌ی اصطکاکی خارج شود و نمونه وارد ناحیه‌ی اتکایی گردد. هم‌چنین بارگذاری نمونه‌های آج‌دار تا قبل از خرابی نمونه ادامه می‌یابد.

مطابق رابطه‌ی پیشنهادی در مبحث دهم مقررات ملی، مقدار مقاومت اتصالات پیچی اصطکاکی براساس کنترل لغزش بحرانی تعیین می‌گردد و برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری اتصالات پیچی از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$R_{nv} = \varphi \mu D_u h_f T_b n_s \qquad (1)$$

که در آن μ مربوط به تعیین وضعیت سطحی است. این مقدار برای کلاس A یعنی سطوح فلس‌دار تمیز و رنگ شده برابر ۰/۵ و برای وضعیت سطحی کلاس B، یعنی سطح تمیزشده با ماسه‌پاشی و رنگ‌نشده برابر ۰/۳ است. Du نسبت پیش‌تنیدگی متوسط پیچ‌ها به پیش‌تنیدگی حداقل پیچ‌ها ست که مساوی ۱/۱۳ است. hf ضریب کاهش درصورت وجود ورق‌های پرکننده در بین قطعات متصل به یکدیگر است که در صورت عدم نیاز به ورق‌های پرکننده در بین قطعات متصل به یکدیگر مساوی ۱ در نظر گرفته می‌شود. Tb حداقل نیروی پیش‌تنیدگی مطابق جدول پیشنهادی آیین‌نامه است و ns تعداد صفحات لغزش می‌باشد. در هر آزمایش خروجی نیرو-جابه‌جایی برای نمونه‌ها گرفته شد و مقادیر ظرفیت باربری اتصالات اصطکاکی پیچی باتوجه به ضرایب و رابطه‌ی پیشنهادی مبحث دهم مقررات ملی به‌دست آمد و با یکدیگر مقایسه گردید.

شکل (٤) یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی را بعد از اعمال بارگذاری نشان می‌شود. بعد از انجام آزمایش توسط دستگاه یونیورسال، نمونه‌ها به‌دلیل اعمال نیروی کششی دچار مقداری اعوجاج می‌شدند که در نمونه‌های آج مربعی به‌دلیل اعمال نیروی بیشتر بر این نمونه‌ها مشهودتر بود.



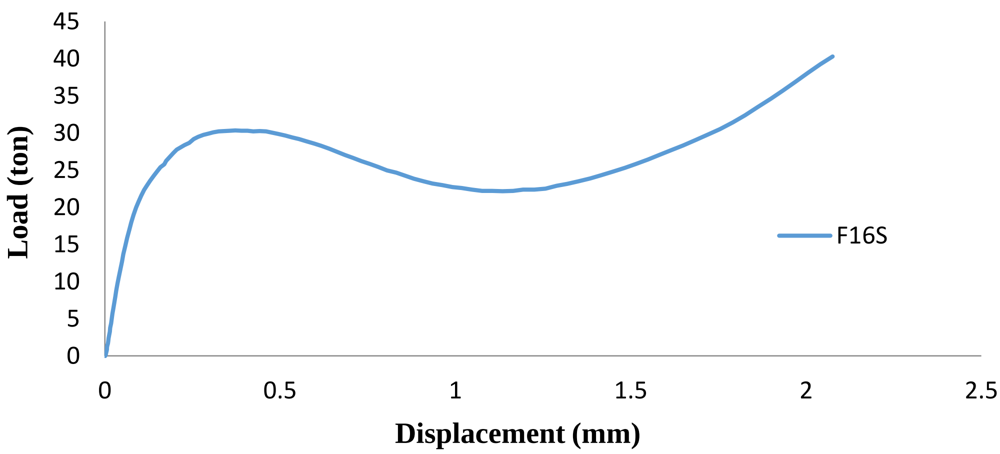
شکل ٤ نمونه بعد از آزمایش

نتایج آزمایش

در شـکل (۵) منحنی حاصـل از آزمایش برای نمونه‌ی F16s (اتصـال با پیچ M16 پرمقاومت و سـطح تماس ماسه‌پاشی‌شده‌ی بدون رنگ) ارائه شده‌است. محور افقی این منحنی بیـانگر جـابـه‌جـایی و محور قـائم آن نشـان‌دهنده‌ی نیروی اعمالی اسـت. این منحنی در ابتدا دارای شـیب مثبت بسـیار زیاد اسـت. پس از آن دارای شـیب منفی می‌شـود و در انتها دوباره شـیب آن مثبت می‌گردد. قسمت اول منحنی، بیانگر مقاومت اصطکاکی است. این ناحیه جابه‌جایی بسیار اندکی دارد. قسمت دوم در اثر جابه‌جایی و لغزش ورق‌ها ایجاد می‌شـود. این حالت تا جایی ادامه دارد که تنه‌ی پیچ به دیواره‌ی سوراخ ورق برخورد کند. هرچه لغزش بیشتر می شود مقاومت کمتر می‌شـود. قسـمت سـوم به‌دلیل مقاومت اتکایی و تبدیل ضریب اصطکاک از حالت ایستایی به حالت دینامیکی اسـت و نشـان می‌دهد که اتصـال وارد حالت اتکایی شده است. بنابراین می‌توان گفت اتصالات دارای دو مقاومت اصطکاکی و اتکایی می‌باشند. مقاومت اصـطکاکی در ابتدا بروز می‌کند و وقتی لغزش اتفاق می‌افتد این مقاومت از دسـت می‌رود و مقاومت اتکایی بروز می‌کند. به همین دلیل بعد از لغزش در مراحل اولیه، مقاومت اتصـال کاهش می‌یابد و با اتکای ورق به پیچ، دوباره مقاومت افزایش پیدا می‌کند.

به‌دلیل حفاظت از دسـتگاه آزمایش ناشـی از شکست ناگهانی، اعمال بار تا شکست ناگهانی ادامه پیدا نکرد. ازآنجایی که هدف این تحقیق تعیین مقاومت اصطکاکی اتصالات است، این محدودیت مشکلی ایجاد نمی‌کند.

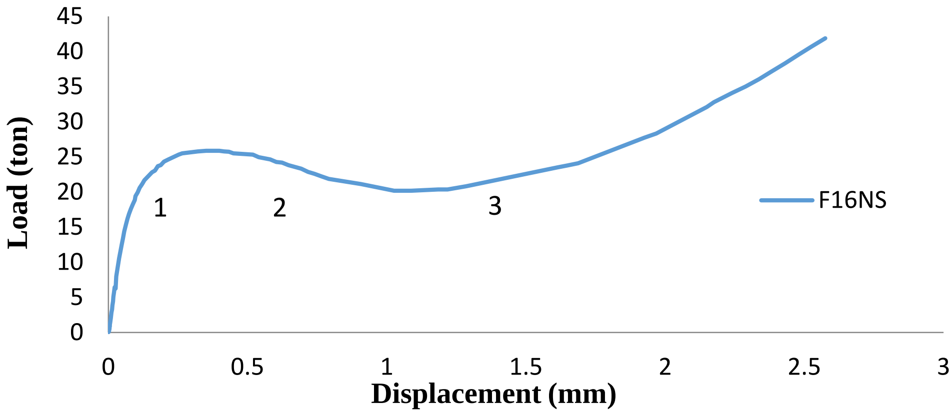
براسـاس شـکل (۵) می‌توان مقاومت اصـطکاکی نمونه‌ی مورد آزمایش را تعیین کرد. نمونه‌ی F16S دارای مقاومت اصطکاکی آزمایشگاهی برابر ۳۰/۳۳ تن است. مقاومت اصطکاکی این اتصال براساس ضوابط پیشـنهادی مبحث دهم مقررات ملی با سـطح تماس کلاس B (ماسه‌پاشی‌شده و رنگ‌نشده) برابر ۲۵/۷٦ تن اسـت. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت مقاومت اتصـال براساس نتایج آزمایشگاه بیشتر از مقاومت محاسبه‌شده براسـاس مبحث دهم مقررات ملی اسـت. این اختلاف بیانگر آن اسـت که در عمل میزان ضـریب اصـطکاک، بیشـتر از ضـریب اصـطکاک پیشـنهادی در مبحث دهم است.



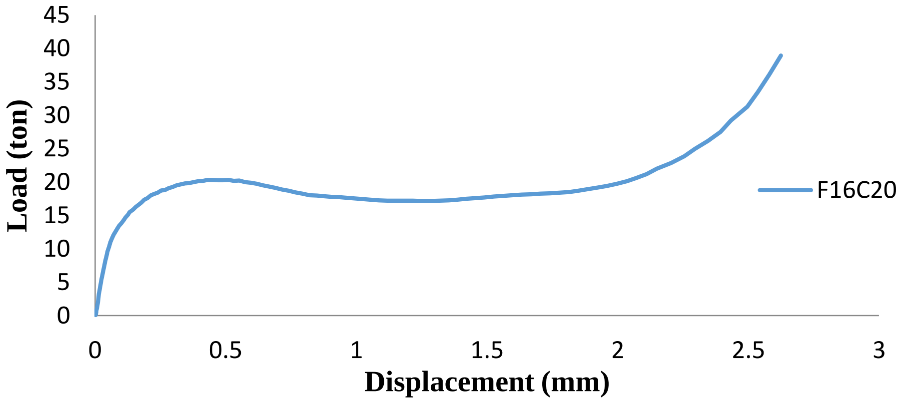
شکل ۵ منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصال نمونه‌ی F16S

در شـــکل (٦) منحنی حاصـــل از آزمایش برای نمونه‌ی F16NS (اتصال با پیچ M16 پرمقاومت و سطح تماس ما سه‌پا شی‌ شده‌ی بدون رنگ) ارائه شده ست. براساس این شکل، مقاومت نمونه تا مقدار ۲۵/۸۸ تن افزایش پیدا می‌کند و پس از لغزش سطوح، با شیب ملایم کاهش پیدا می‌کند. مقاومت ماکزیمم در جابه‌جایی ۰/۳ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. افزایش مقاومت پس از جابه‌جایی ۲ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. نتایج نشان می‌دهد این اتصال دارای مقاومت اصطکاکی برابر ۲۵/۸۸ تن است و ماسه‌پاشی نکردن، باعث کاهش مقاومت اصطکاکی می‌شود. در مبحث دهم مقررات ملی، این حالت برای سطح تماس مجاز نیست و درنتیجه برای این حالت ضریب اصطکاکی پیشنهاد نشده‌است.

شکل (۷) مربوط به نمونه‌ی F16C20 است. نمونه‌ی F16C20 شامل پیچ‌های M16 پرمقاومت و نوع سطح تماس، رنگ‌شده با ضخامت ۲۰ میکرون است که مقاومت اصطکاکی آزمایشگاهی آن معادل ۲۰/۳۲ تن است و در جابه‌جایی ۰/۳ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. وقتی مقدار جابه‌جایی به ۲ میلی متر می‌رسد، دوباره مقاومت افزایش می‌یابد. براساس ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، مقاومت اصطکاکی این اتصال با سطح تماس کلاس A (ماسه‌ی تمیز و رنگ‌شده) برابر ۱۵/۴۵ تن است. مشاهده می‌شود که در این حالت نیز مقدار حاصل از آزمایش بیشتر از مقدار آیین‌نامه‌ای است؛ لذا می‌توان گفت که رنگ، مقاومت اصطکاکی را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در مبحث دهم مقررات ملی، درصورت استفاده از رنگ برای ناحیه‌ی اتصال اصطکاکی، فقط ۲۰ میکرون ضخامت رنگ مجاز است.



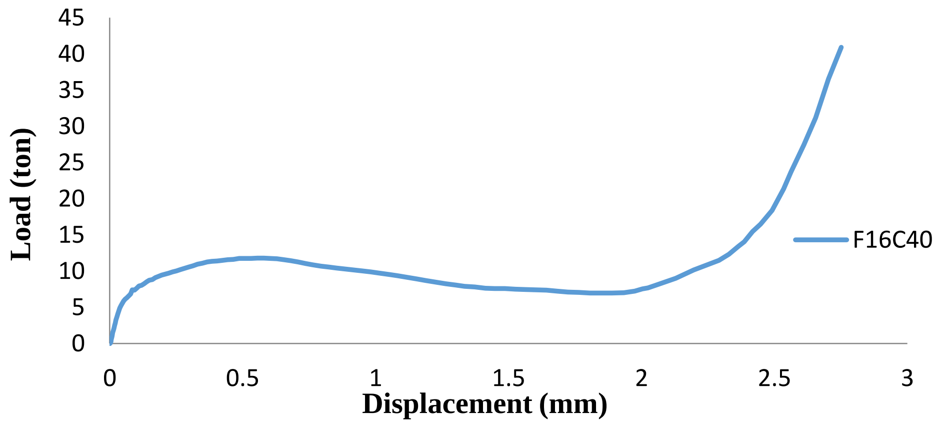
شکل ٦ منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصال نمونه‌ی F16 NS



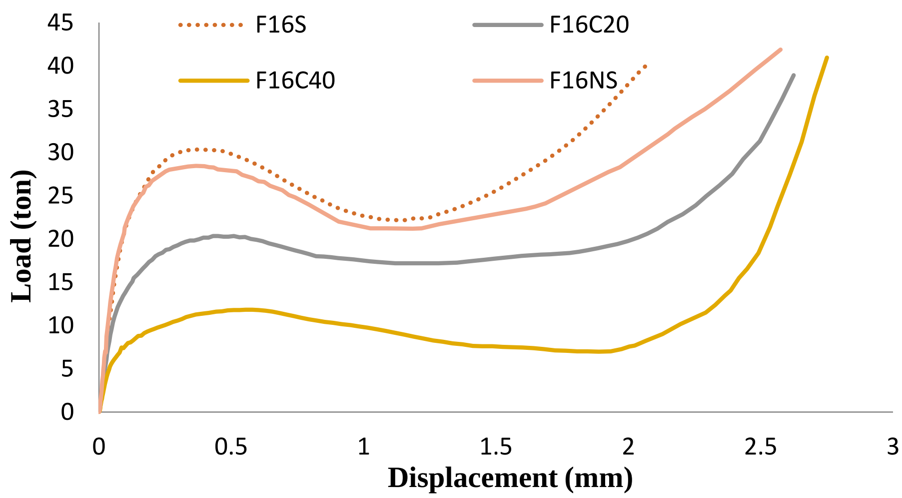
شکل ۷ منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصال نمونه‌ی F16 C20

شـــکل (۸) مربوط به نمونه‌ی F16C40 شـــامل پیچ‌های M16 پرمقاومت و نوع سطح تماس رنگ‌شده با ضـــخامت ۴۰ میکرون اســـت. مقاومت اصـــطکاکی آزمایشـــگاهی این اتصـــال برابر ۱۱/۸۲ تن اســـت که در جابه‌جایی ۰/۴ میلی‌متر اتفاق می‌افتد و پس از لغزش سطوح، مقاومت اتصال تا ۶ تن کاهش پیدا می‌کند. این مقادیر نشان می‌دهد که ضخامت ۴۰ میکرون، مقاومت اتصـــال اصـــطکاکی را به‌شـــدت کاهش می‌دهد. روند افزایش مقاومت در جابه‌جایی ۲/۳ میلی‌متر شـــروع می‌شود. در مبحث دهم مقررات ملی، ضخامت رنگ ۴۰ میکرون برای ناحیه‌ی اتصال اصطکاکی مجاز نیست.

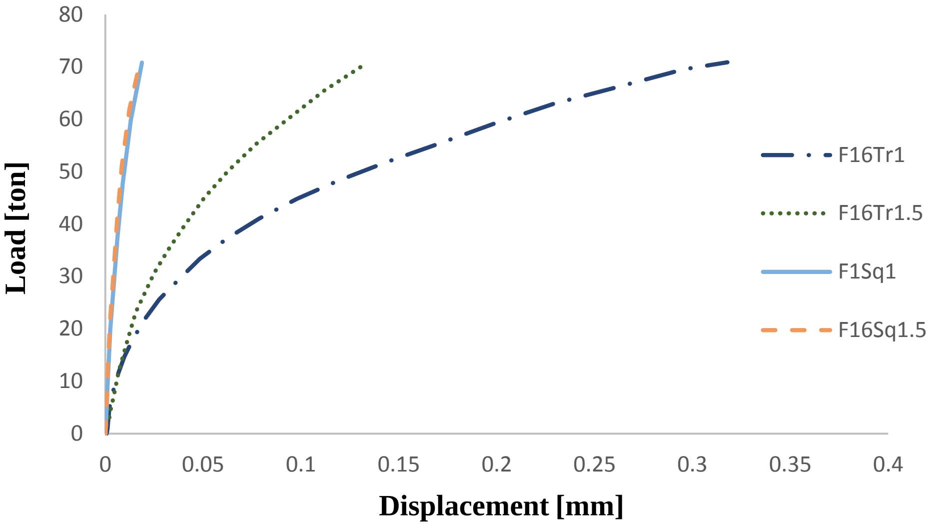
در شـــکل (۹) نتایج مربوط به نمونه‌های با پیچ M16 و نوع ســـطح تماس مختلف ارائه شـــده‌اســـت. در تمامی آنها مقاومت اصطکاکی اتصال در جابه‌جایی ۰/۳ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. در تمامی حالت‌ها پس از مقاومت اصـــطکاکی به‌دلیل لغزش، یک افت مقاومت اتفاق می افتد. همان‌گونه که از شـــکل مشـــخص اســـت کمترین مقاومت اصـــطکاکی مربوط به حالت رنگ‌شـــده با ضـــخامت ۴۰ میکرون و بیشـــترین مقاومت مربوط به حالت ماســـه‌پاشـــی‌شـــده‌ی بدون رنگ اســـت. هر چند مقاومت نظیر حالت ماســـه‌پاشـــی‌شـــده و نشـــده چندان تفاوتی با هم ندارد.



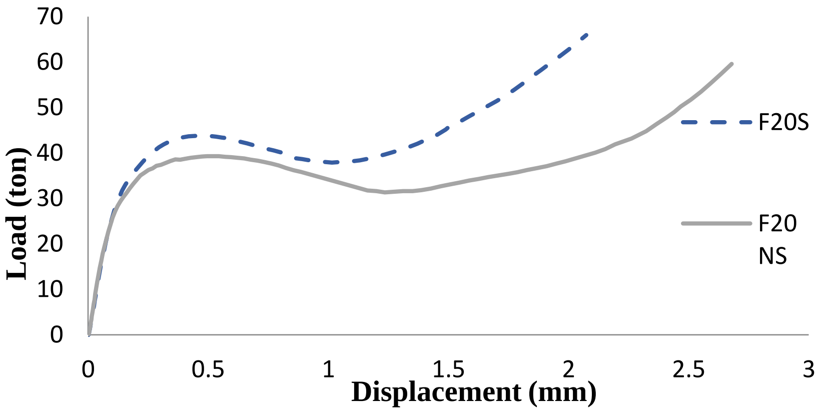
شکل ۸ منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصال نمونه‌ی F16 C40



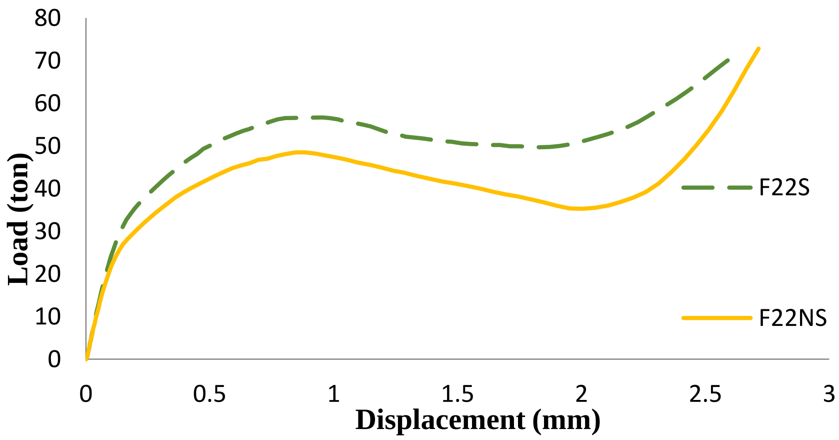
شکل ۹ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با پیچ ۱۶ میلی‌متر و سطوح غیرآج‌دار



شکل ۱۰ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با پیچ ۱٦ میلی‌متر و سطوح آج‌دار



شکل ۱۱ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با پیچ ۲۰ میلی‌متر



شکل ۱۲ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با پیچ ۲۲ میلی‌متر

در شکل (۱۰) نتایج مربوط به نمونه‌های با پیچ M16 و سطوح آج‌دار مختلف ارائه شده‌است. برای مقایسه بین نمونه‌های با سطوح آج‌دار در ناحیه‌ی اتصال، از آج‌های به شکل مثلث و مربع با گام ۳ میلی‌متر و ارتفاع‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر استفاده شد. به‌دلیل محدودیت در بارگذاری، تمامی نمونه‌ها تا ۷۰ تن بارگذاری شدند.

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که اتصالات با سطوح آج‌دار مقاومت اصطکاکی را به‌میزان قابل توجهی افزایش می دهد. به‌نظر می‌رسد تا نیروی ۷۰ تن هنوز مقاومت اصطکاکی حاصل نشده‌است و اگر آزمایش ادامه پیدا می‌کرد مقاومت بیشتری از اتصال بروز پیدا می‌کرد. هم‌چنین از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که میزان سختی و مقاومت اتصال با آج مربعی بسیار بیشتر از اتصال با آج مثلثی است. در عین حال در یک بار ثابت، میزان جابه‌جایی اتصال با آج مربعی کمتر از اتصال با آج مثلثی است. مطابق این شکل هرچه ارتفاع آج مثلثی بیشتر باشد، رفتار اتصال به رفتار اتصال مربعی نزدیک‌تر می‌شود؛ زیرا هرچه ارتفاع آج بیشتر باشد درگیری آج‌ها بیشتر می شود، بنابراین جابه‌جایی اتصال در نیروی‌های یکسان کمتر می‌شود. در نمونه‌ی F16Tr1 شیب منحنی نیرو-جابه‌جایی بسیار زیاد است که بیانگر سختی بسیار زیاد اتصال در ناحیه‌ی الاستیک است. سختی اتصال به‌دلیل وجود آج در ناحیه‌ی سطح تماس اتصال و نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ ها، اجازه‌ی تغییرمکان و جابه‌جایی در اتصال را نمی‌دهد؛ زیرا با قفل و چفت‌شدن آج‌ها دریکدیگر، جابه‌جایی‌ها بسیار ناچیز می‌شود و به‌ازای جابه‌جایی بسیار کم، مقاومت اتصال بسیار زیاد خواهد شد. مطابق آزمایش‌های انجام شده، جابه‌جایی نمونه‌ی F16Tr1 به‌ازای نیروی ۶۰ تن برابر ۰/۱۹۸ میلی‌متر و برای نمونه‌ی F16Tr1.5 برابر ۰/۰۹۲ میلی‌متر است. در جدول (۲) مقدار جابه‌جایی نمونه‌های آج‌دار در نیروی اعمالی ۶۰ تن با هم مقایسه شده‌است. همان‌گونه که از جدول پیداست بیشترین جابه‌جایی مربوط به آج مثلثی به عمق ۱ میلی‌متر و کمترین جابه‌جایی مربوط به آج مربعی با عمق ۱/۵ میلی‌متر است.

جدول ۲ مقایسه‌ی مقدار جابه‌جایی نمونه‌های آج‌دار

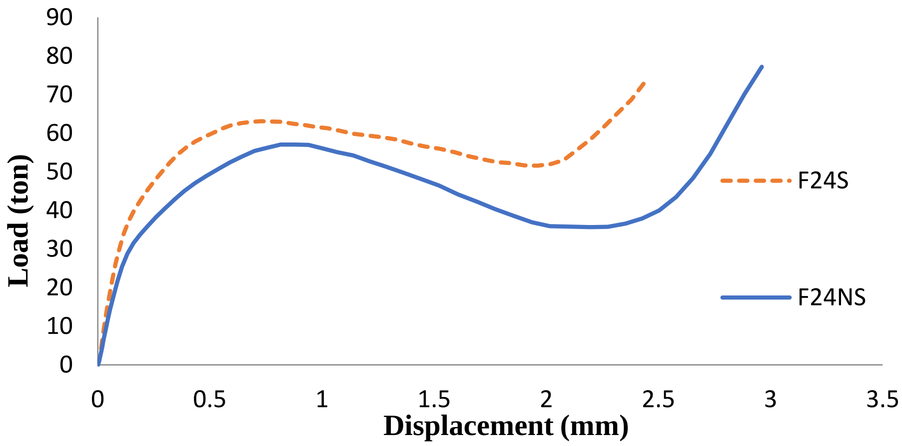
نام نمونه	جابه‌جایی (mm)
F16Tr1	۰/۱۹۸۵
F16Tr1.5	۰/۰۹۲۹
F16Sq1	۰/۰۱۳۰
F16Sq1.5	۰/۰۱۲۳

در شکل (۱۱) نتایج حاصل برای نمونه‌ها با قطر M20 ارائه شده‌است. برای نمونه‌ی F20S، مقاومت حاصل از آزمایش برابر ۴۳/۷۸ تن به‌دست آمد. مقاومت اصطکاکی این اتصال براساس ضوابط پیشنهادی مبحث دهم مقررات ملی با سطح تماس کلاس B (ماسه‌پاشی‌شده و رنگ‌نشده) برابر ۴۰/۴۵ تن تعیین گردید. برای این نمونه نیز مقادیر آزمایشگاهی بیشتر بود. هم‌چنین برای نمونه‌ی F20NS مقاومت اصطکاکی از آزمایش ۳۹/۳۱ تن به‌دست آمد.

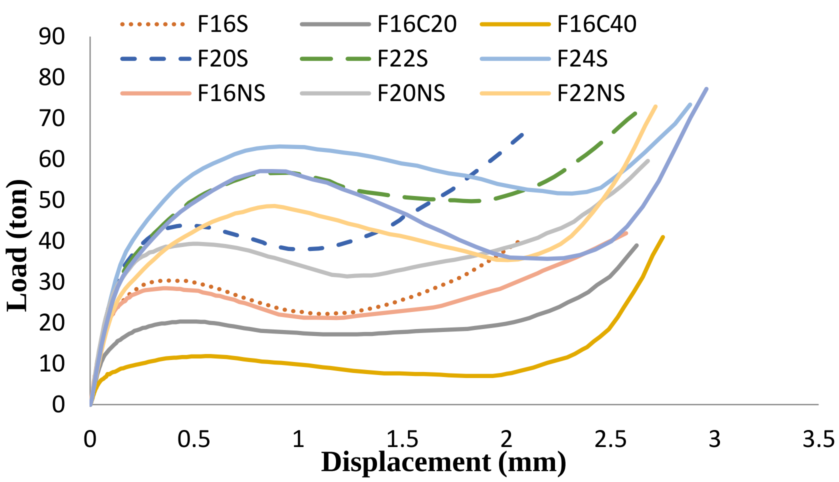
در شکل (۱۲) نتایج به‌دست‌آمده برای نمونه‌های با قطر M22 ارائه شده‌است. نمونه‌ی F22S شامل پیچ‌های سایز M22 پرمقاومت و نوع سطح تماس سندبلاست‌شده است که مقاومت اصطکاکی آزمایشگاهی آن برابر ۵۶/۶۸ تن است. مقاومت اصطکاکی این اتصال با سطح تماس کلاس B (ماسه‌پاشی‌شده و رنگ‌نشده) برابر ۴۹/۹۴ تن محاسبه شد. برای این نمونه نیز مقادیر آزمایشگاهی بیشتر از مقادیر آئین‌نامه‌ای بود. هم‌چنین برای نمونه‌ی F22NS مقاومت اصطکاکی حاصل از آزمایش برابر ۴۸/۵۳ تن به‌دست آمد.

شکل (۱۳) مربوط به نمونه‌های با قطر M24 است. نمونه‌ی F24S شامل پیچ‌های سایز M24 پرمقاومت و نوع سطح تماس سندبلاست‌شده است که مقاومت اصطکاکی آزمایشگاهی آن برابر ۶۳/۰۹ تن و میزان مقاومت اصطکاکی محاسباتی آن در وضعیت کلاس B، برابر ۵۸/۱۰ تن تعیین شد. نمونه‌ی F24NS شامل پیچ‌های سایز M24 پرمقاومت و نوع سطح تماس سندبلاست نشده است که مقاومت اصطکاکی آزمایشگاهی آن برابر ۵۷/۰۹ تن است.

در شـــکل (١٤) و جدول (٣) نتایج حاصـــل از آزمایش ها برای تمامی نمونه ها با ســـطوح غیرآج‌دار مقایسه شدهاست. از این منحنی‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که دو عامل در ظرفیت باربری اتصالات اصطکاکی پیچی بیشـــتر تأثیر گذار اســـت؛ عامل اول نیروی پیش‌تنیدگی روی پیچ و عامل دوم ضریب اصطکاک بین سطوح اتصال است، بنابراین هرچه این دو مقدار بیشتر باشـــند، میزان ظرفیت باربری نمونه بیشـــتر می‌شـــود. نمونه‌ی سندبلاست شده با پیچ ٢٤ میلی‌متر، بیشترین مقاومت را به‌دلیل بالاتر بودن نیروی پیش‌تنیدگی و ضریب اصطکاک دارا بود درحالی‌که نمونه با ضخامت ٤٠ میکرون رنگ با ســـایز پیچ ١٦ میلی‌متر کمترین مقاومت را به‌دلیل کمترین پیش‌تنیدگی و ضـــریب اصـــطکاک داشـــت. باتوجه به منحنی‌ها شـــیب همه‌ی نمونه‌ها بعد از حدود ٢ میلی‌متر جابه‌جایی دچار تغییر و سیر صعودی می شوند که به‌منزله‌ی ورود اتصال به ناحیه‌ی اتکایی است.



شکل ١٣ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با پیچ ٢٤ میلی‌متر



شکل ١٤ مقایسه‌ی منحنی نیرو- جابه‌جایی اتصالات با سطوح غیرآج‌دار

جدول ۳ نتایج مربوط به اتصالات پیچی اصطکاکی با سطوح بدون آج

نام نمونه	آستانه‌ی لغزش ایستایی (mm)	مقاومت اتصال اصطکاکی (ton)	جابه‌جایی در آستانه‌ی اتکایی (mm)	مقاومت در آستانه‌ی اتکایی (ton)
F16C40	۰/۵۵	۱۱/۸۲	۱/۸۸۹	٦/۹۷
F16C20	۰/٤۳	۲۰/۳۲	۱/۲٤۸	۱۷/۱۸
F16NS	۰/۳۸	۲۵/۸۸	۱/۱۸۵	۲۱/۱۷۸
F16S	۰/۳٦	۳۰/۳۳	۱/۱۳٤	۲۲/۱۵
F20NS	۰/٤۹	۳۹/۳۱	۱/۲۳٤	۳۱/۲۹۸
F20S	۰/٤٦	٤۳/۷۸	۱/۰۱۵	۳۷/۸۸٦
F22NS	۰/۸۸٦	٤۸/۵۳	۲/۰۰۵۷	۳۵/۳۰
F22S	۰/۷۵۷	۵٦/٦۸	۱/۸٤٦	٤۹/٦۹۲
F24NS	۰/۸۱	۵۷/۰۹	۲/۱۹۷	۳۵/٦٤
F24S	۰/۷۲۸	٦۳/۰۹۳	۲/۹٦۱	۵۱/٦۰

نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر نوع سطح تماس ورق‌ها بر مقاومت اصطکاکی اتصالات پیچی و هم‌چنین پیشنهاد سطوح تماس جدید به‌منظور افزایش ظرفیت باربری اصطکاکی است. برای این منظور ١٤ نمونه از اتصالات پیچی اصطکاکی با سطوح تماس مختلف انتخاب گردید و تحت آزمایش قرار گرفت. سطوح تماسی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: سطح تماس ماسه‌پاشی‌شده، ماسه‌پاشی‌نشده، رنگ با ضخامت ۲۰ میکرون، رنگ با ضخامت ٤۰ میکرون، سطح آج‌دار مثلثی و سطح آج‌دار مربعی. نتایج به‌دست‌آمده از این آزمایش عبارتند از:

۱. درمورد مقاومت اتصالات پیچی، مقادیر پیشنهادی در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان محافظه‌کارانه است.
۲. در اتصالات پیچی اصطکاکی، سطوح آج‌دار بیشترین مقاومت اصطکاکی را دارند. درضمن، آج مربعی نسبت به آج مثلثی سختی عملکرد بهتری دارد.
۳. باتوجه به مقاومت اصطکاکی بالای سطوح آج‌دار می‌توان از آن برای طراحی اتصالات ساختمان‌هایی با اهمیت خیلی زیاد در برابر زلزله استفاده نمود.
٤. نسبت مقاومت اصطکاکی نمونه‌های ماسه‌پاشی‌شده، به مقاومت اصطکاکی نمونه‌های ماسه‌پاشی‌نشده و رنگ‌شده با ۲۰ و ٤۰ میکرون رنگ به‌ترتیب برابر ۱/۲، ۱/۵، و ۲/۵ می‌باشد.
۵. باتوجه به نتایج این تحقیق، پیشنهاد می‌شود در طراحی اتصالات پیچی اصطکاکی با ۲۰ میکرون رنگ، ضریب اصطکاک برابر ۰/۳۵ درنظر گرفته شود.

تقدیر و تشکر

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه گروه صنعتی مادسا انجام شده‌است و شایسته است که از زحمات مسئولان این آزمایشگاه تقدیر و تشکر گردد.

مراجع

1. Iranian National Building Codes Compilation Office, "Iranian National Building Code, Part 10: steel structure design", Ministry of Housing and Urban Development, (2014).
2. Zeynali, Y., Samimi, M. J., Mazroei, A., Marnani, J. A., and Rohanimanesh, M. S., "Experimental and

Numerical Study of Frictional Effects on Block Shear Fracture of Steel Gusset Plates with Bolted Connections", *Thin-Walled Struct*, Vol. 121, Pp. 8–24, (2017).

3. Couchaux, M., Hjiaj, M., Ryan, I., and Bureau, A., "Effect of Contact on the Elastic Behaviour of Tensile Bolted Connections", *J. Constr. Steel Res*, Vol. 133, Pp. 459–474, (2017).
4. Rodgers, G. W., Chase, J. G., Causse, R., Chanchi, J., and MacRae, G. A., "Performance and Degradation of Sliding Steel Friction Connections: Impact of Velocity, Corrosion Coating and Shim Material", *Eng. Struct.*, Vol. 141, Pp. 292–302, (2017).
5. Guo, X., Zhang, Y., Xiong, Z., and Xiang, Y., "Load-bearing Capacity of Occlusive High-strength Bolt Connections", *J. Constr. Steel Res*, Vol. 127, Pp. 1–14, (2016).
6. Hu, Y., Shen, L., Nie, S., Yang, B., and Sha, W., "FE Simulation and Experimental Tests of High-strength Structural Bolts under Tension", *J. Constr. Steel Res.*, Vol. 126, Pp. 174–186, (2016).
7. Shahani, A. R., and Shakeri, I., "Experimental Evaluation of the Effect of Preload on the Fatigue Life of Bolts", *Int. J. Steel Struct.*, Vol. 15, No. 3, Pp. 693–701, (2015).
8. Kim, I.-T., Lee, J. M., Huh, J., and Ahn, J.-H., "Tensile Behaviors of Friction Bolt Connection with Bolt Head Corrosion Damage: Experimental Research B", *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 59, Pp. 526–543, (2016).
9. Wei, F., Fang, C., Yam, M. C. H., and Zhang, Y., "Fracture Behaviour and Design of Steel Tensile Connections with Staggered Bolt Arrangements", *Int. J. steel Struct.*, Vol. 15, No. 4, Pp. 863–879, (2015).
10. Wang, Y.-B., Lyu, Y.-F., Li, G.-Q., and Liew, J. Y. R., "Behavior of Single Bolt Bearing on High Strength Steel Plate", *J. Constr. Steel Res.*, Vol. 137, Pp. 19–30, (2017).